

2009.March

Yamagata Univ. クォーク研

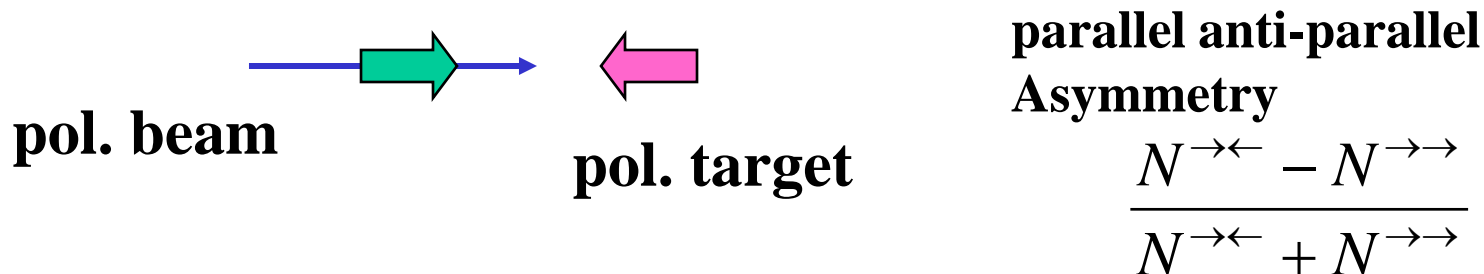
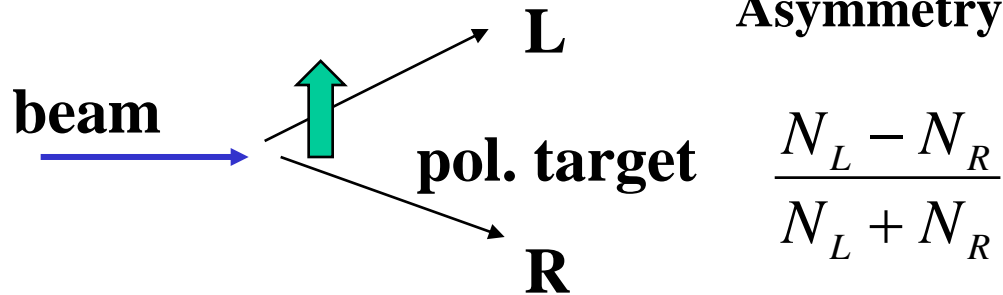
偏極ターゲットシステムの概要

岩田高広

- 偏極ターゲットとは...
- 偏極原理
- 冷却方法
- 偏極励起
- 偏極度測定
- 標的物質の調整
- 偏極標的実用例

偏極ターゲットとは.....

- 原子核のスピンを偏らせた(偏極させた)ターゲット
- 高エネルギー物理では陽子、重陽子、ヘリウム3、リチウムなどの比較的軽い原子核を偏極させて利用
- 偏極方向
 - 横偏極: ビーム軸に対して垂直
 - 縦偏極: ビーム軸の方向



偏極度(polarization)とは

定義: spin \vec{S}

偏極度 (vector polarization) $P_v = \frac{\langle S_z \rangle}{S\hbar}$

ただし S はスピン量子数

$$S = \frac{1}{2} \text{ のとき } P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$$

$$S_z \quad +\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2}$$

$$\text{粒子数} \quad N_+ \quad N_-$$

スピンと磁気能率

電子スピン

$$\mu_e = g_e \mu_B S \quad g_e \approx -2$$

Bohr magneton: $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c}$

原子核

$$\mu_i = g_i \mu_N I$$

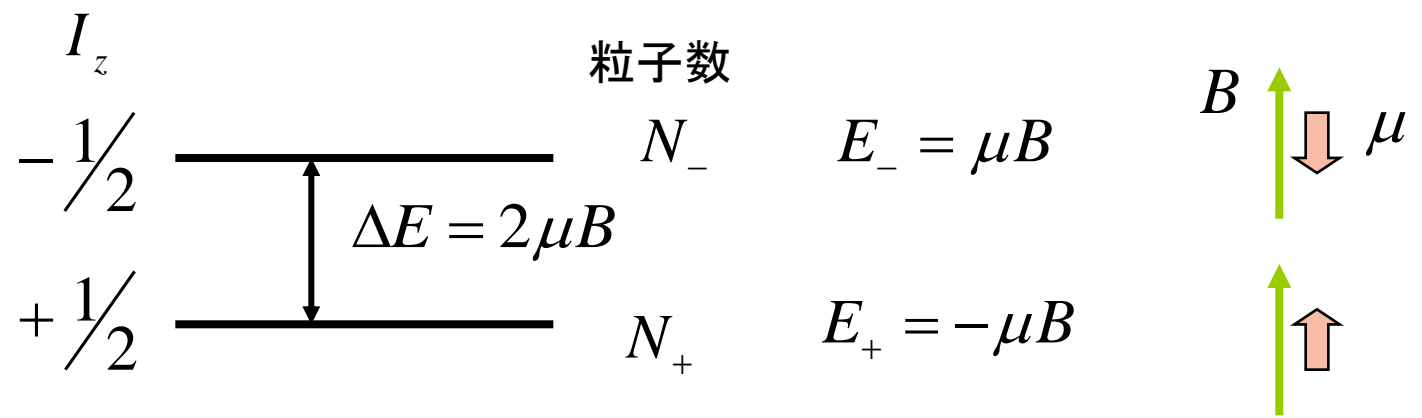
$$g_p \approx 2 \times 2.8$$

$$g_n \approx -2 \times 1.9$$

nuclear magneton: $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c}$

磁場中での磁気能率

磁場: B (z 方向) \rightarrow ゼーマン分離 $E = -\mu \cdot B$



熱平衡 (温度: T) \rightarrow ボルツマン分布

$$P = \frac{e^{-\frac{(-\mu B)}{kT}} - e^{-\frac{\mu B}{kT}}}{e^{-\frac{(-\mu B)}{kT}} + e^{-\frac{\mu B}{kT}}} = \frac{2 \sinh\left(\frac{\mu B}{kT}\right)}{2 \cosh\left(\frac{\mu B}{kT}\right)} = \tanh\left(\frac{\mu B}{kT}\right) \approx \frac{\mu B}{kT}$$

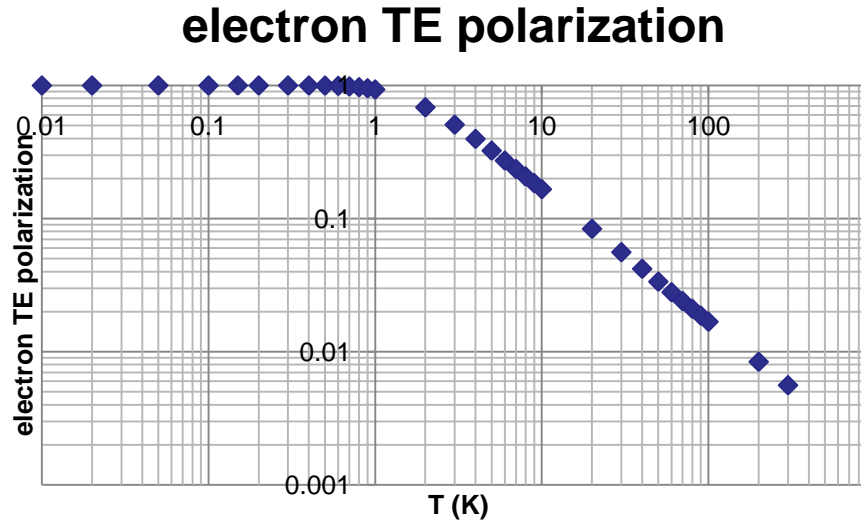
$$N_i \propto e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

低温 ($T \rightarrow 0$)、高磁場 ($B \rightarrow$ 大)

\rightarrow 高偏極

$$\frac{\mu B}{kT} \ll 1$$

熱平衡での電子偏極



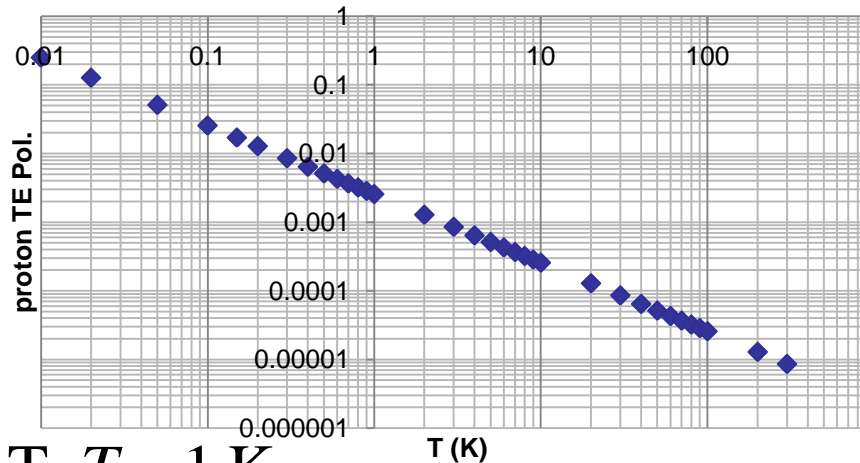
$$B = 2.5 \text{ T}, T = 1 \text{ K}$$

$$\boxed{\text{電子}} \quad P_e \approx \tanh\left(\frac{\mu_e B}{kT}\right) = 99\%$$

確かに、磁場をかけて低温にするだけで、高い電子偏極が得られる

熱平衡状態での核偏極

proton TE polarization v.s. Temperature



$B = 2.5 \text{ T}, T = 1 \text{ K}$

陽子 $P_p \approx \tanh\left(\frac{\mu_p B}{kT}\right) = 0.26\%$

極めて低い偏極度

核偏極は簡単ではない

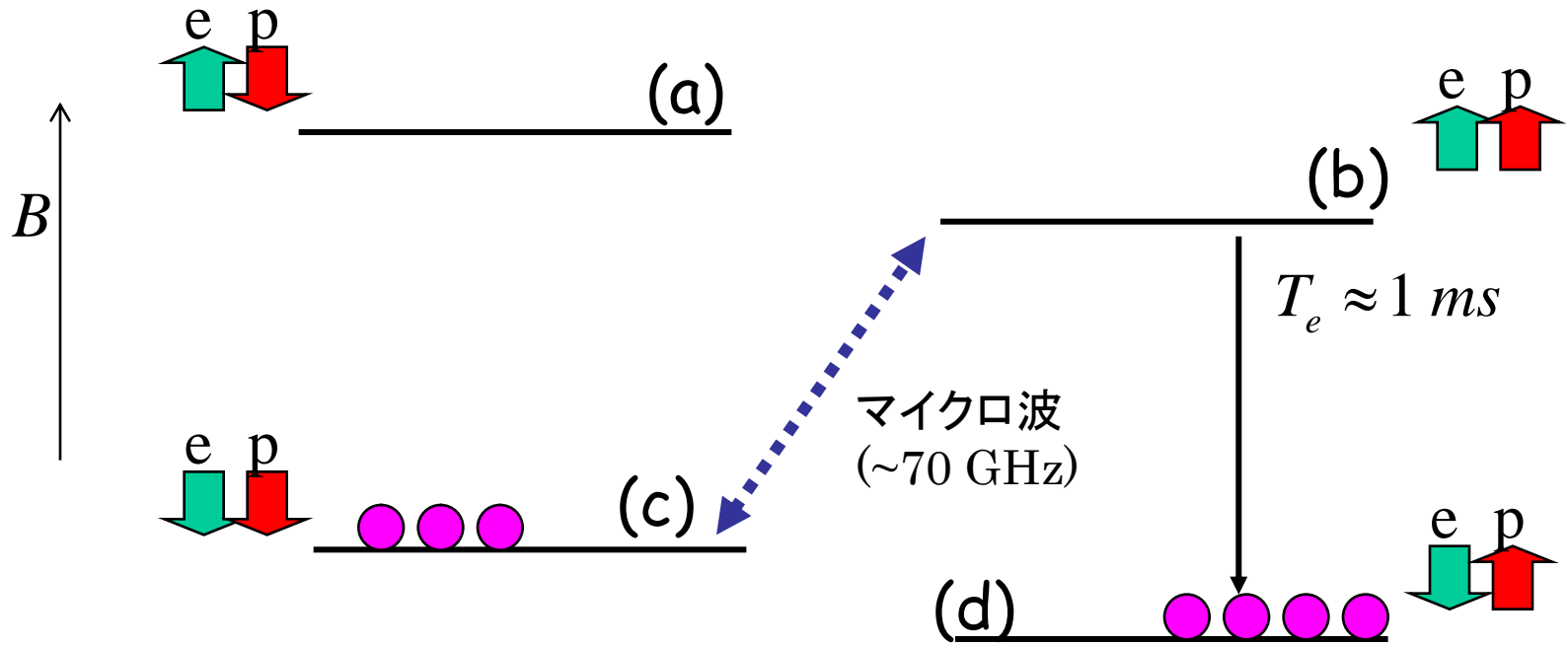
原子核の磁気能率が小さいことが原因

$$\frac{\mu_p}{\mu_e} \approx \frac{1}{1000}$$

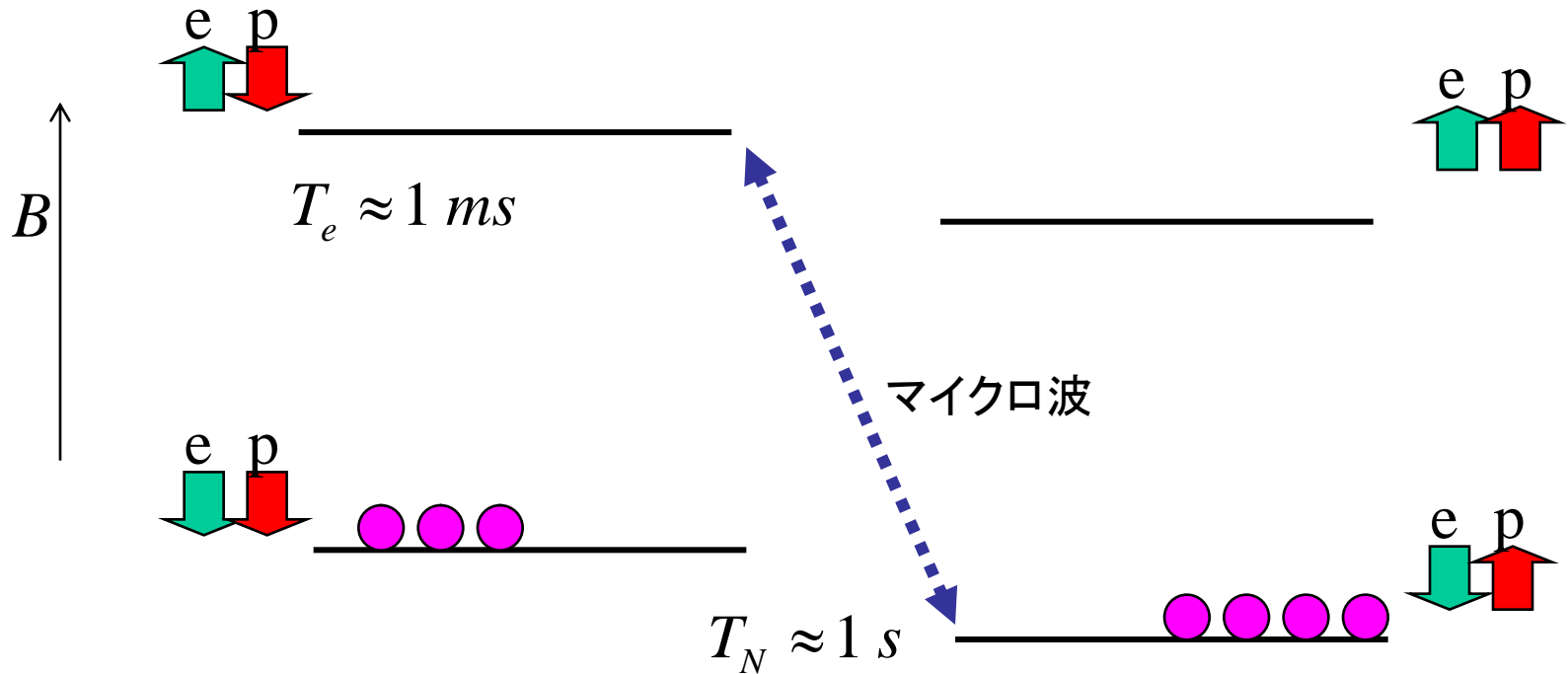
それでも高偏極がほしい → 能動核偏極

(DNP=Dynamic Nuclear Polarization)

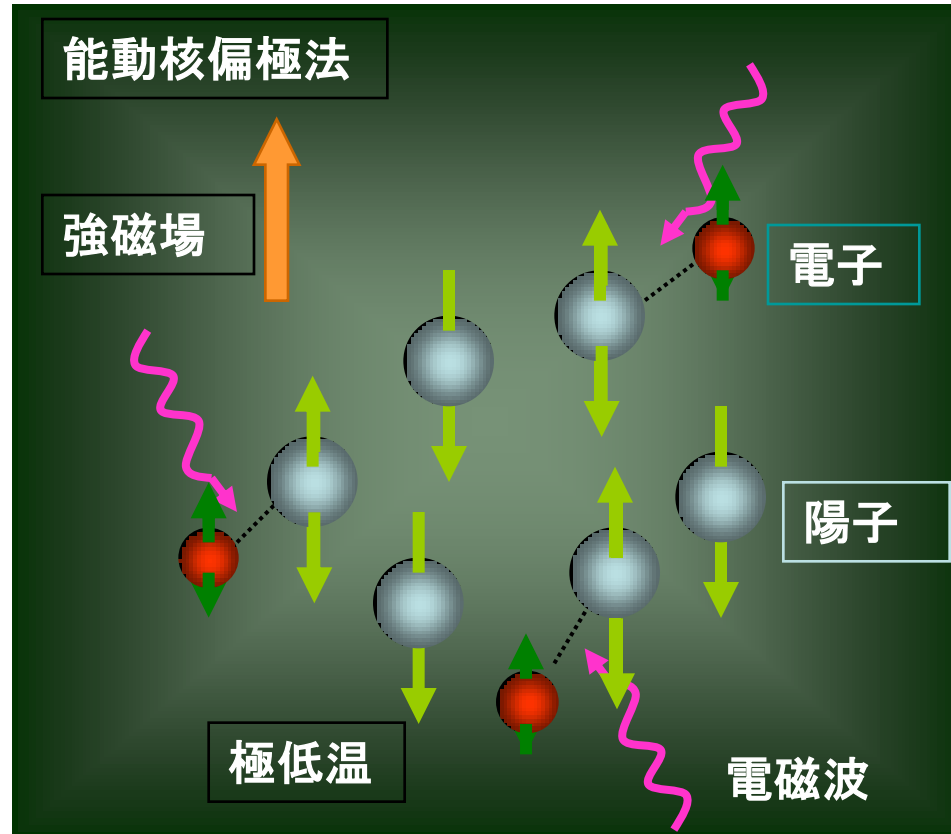
Dynamic Nuclear Polarization



Dynamic Nuclear Polarization



Dynamic Nuclear Polarization

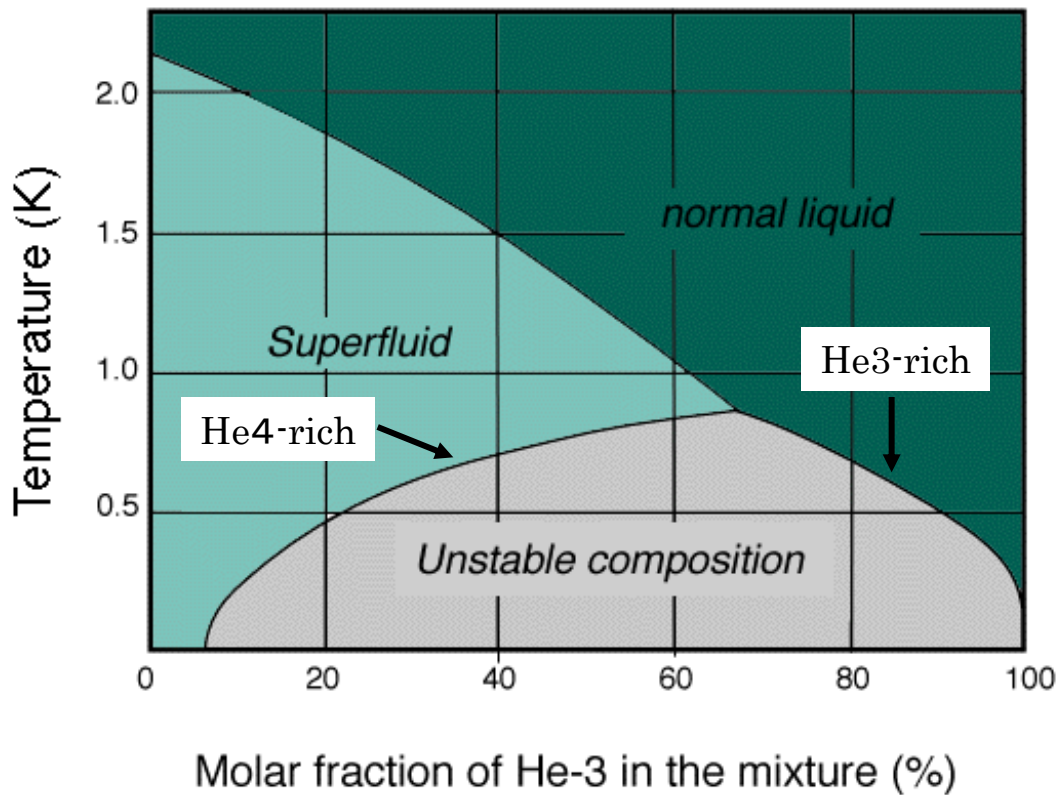


冷却方法

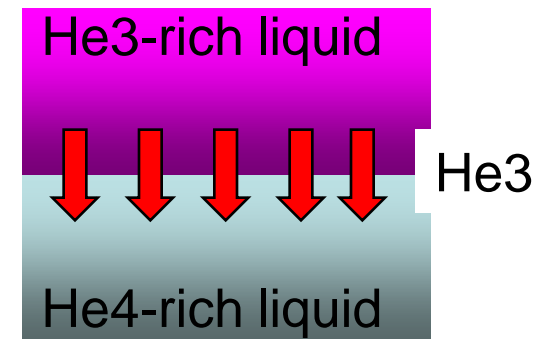
- 極低温でも大きな冷凍能力が必要
 - (マイクロ波が持ち込む熱に耐えるため)
- → 希釈冷凍法 (dilution refrigeration)
 - He3がHe4に拡散する際の吸熱反応を利用
 - 冷凍能力: ~mW at 100 mK

Dilution Refrigeration

He3とHe4の混合液体の性質

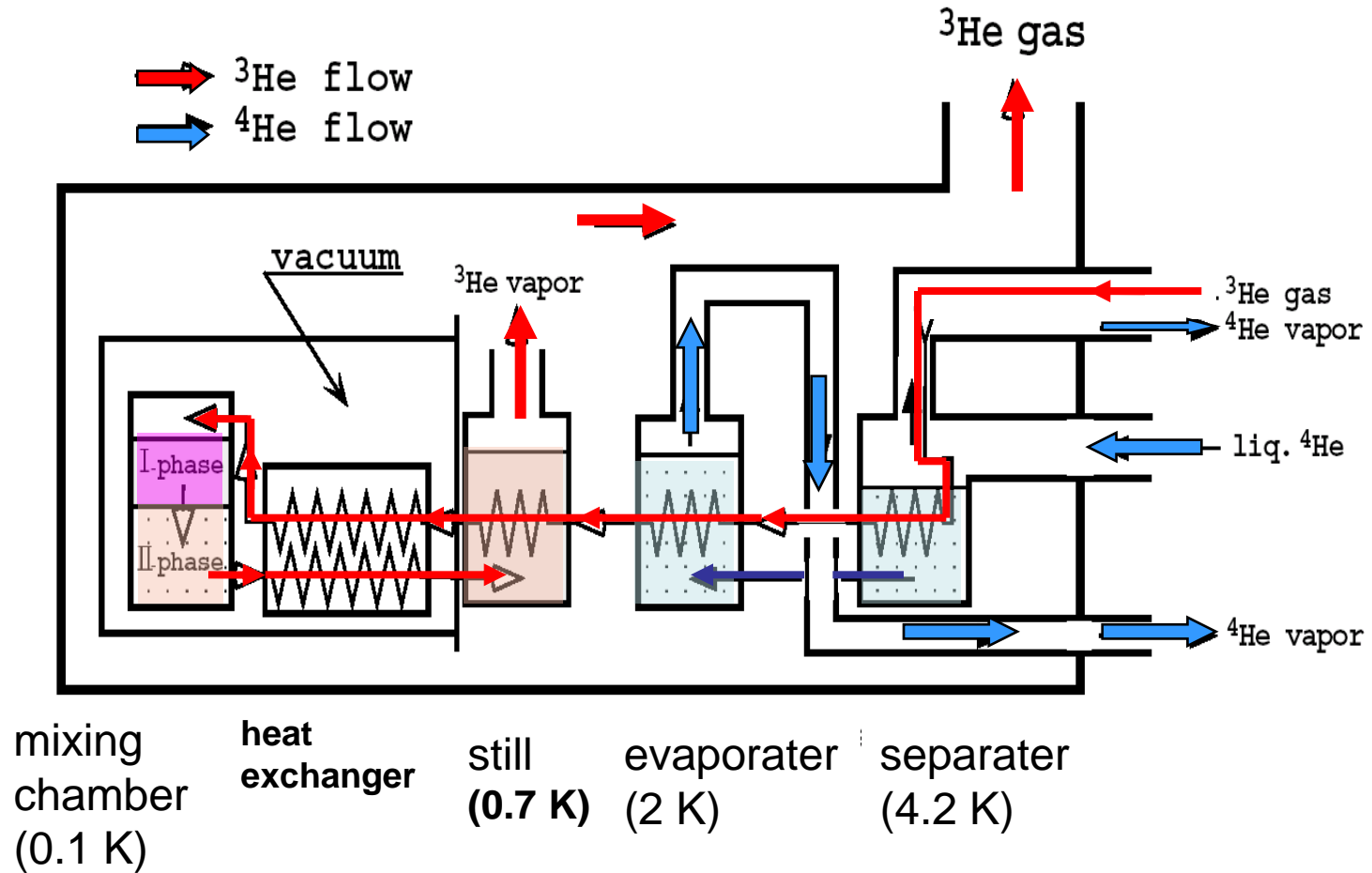


$T < 0.8$ Kで2相分離



He3が超流動状態のHe4
中に拡散するとき、吸熱

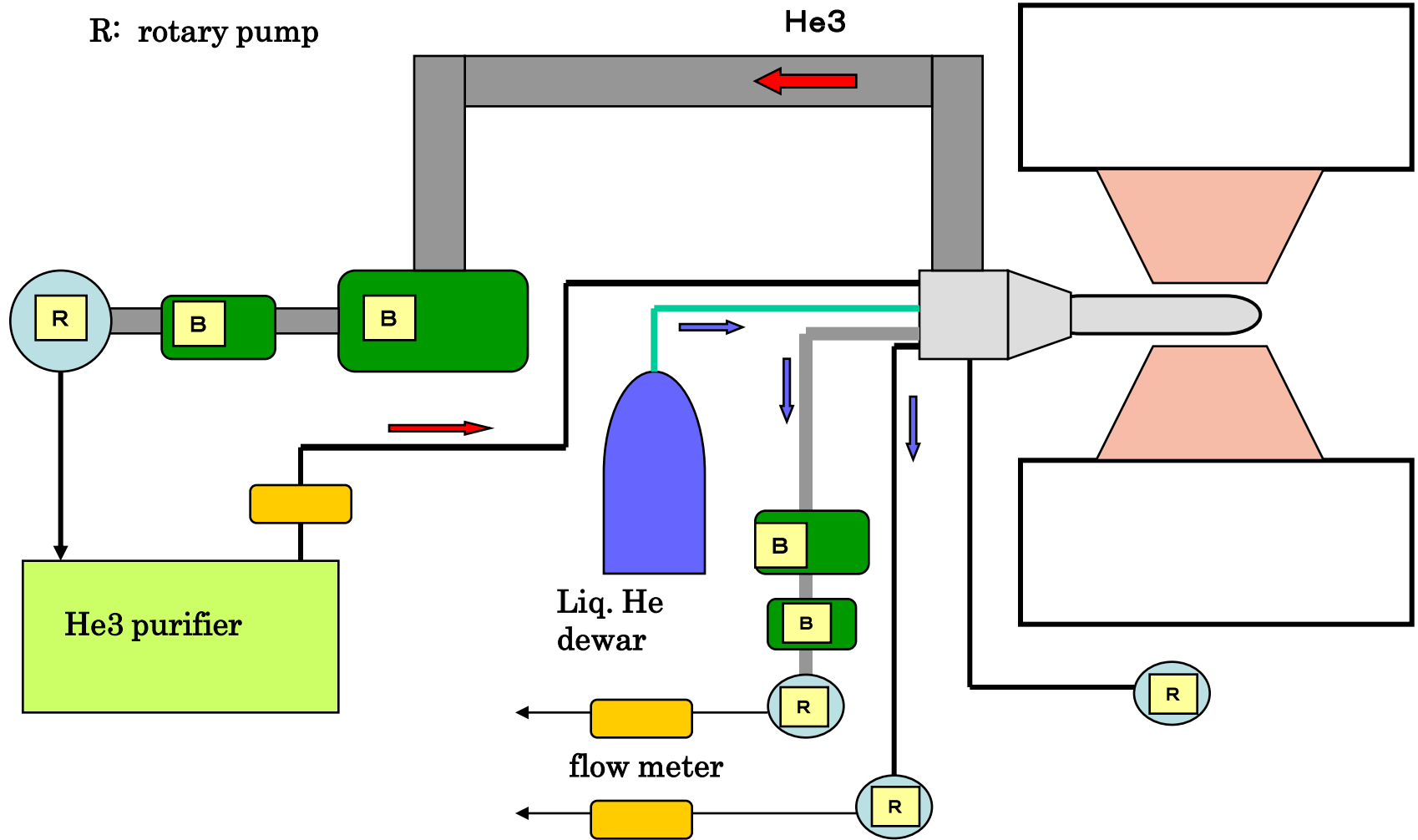
Dilution Refrigerator



冷却システム

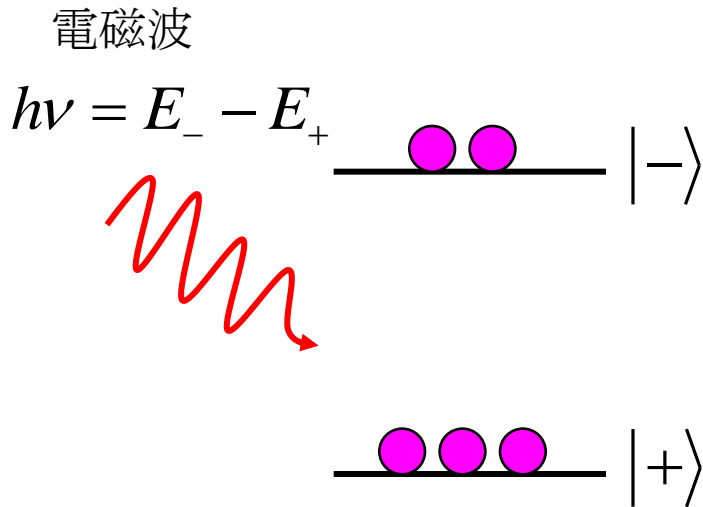
B: booster pump

R: rotary pump



偏極度測定

polarization $P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$



吸収の確率

$$|+\rangle \rightarrow |-\rangle \propto N_+$$

誘導放出の確率

$$|-\rangle \rightarrow |+\rangle \propto N_-$$

核磁気共鳴信号強度は

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad \text{に比例}$$

核磁気共鳴による偏極度測定

核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance=NMR)

- RFによるスピン系の応答は複素磁化率の変化

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$$

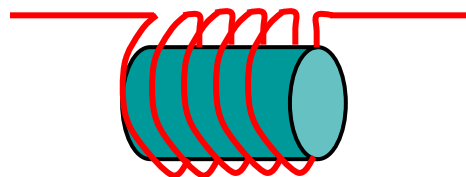
- 偏極度は虚数部(吸収)の積分値に比例
→信号強度の周波数積分が偏極度に比例

$$P = C \int_0^{\infty} \chi''(\omega) d\omega = C \cdot S$$

- 磁化率の測定
→インピーダンスの測定

$$L(\omega) = L_0 (1 + 4\pi\eta\chi(\omega))$$

η : 充填率



核磁気共鳴信号検出

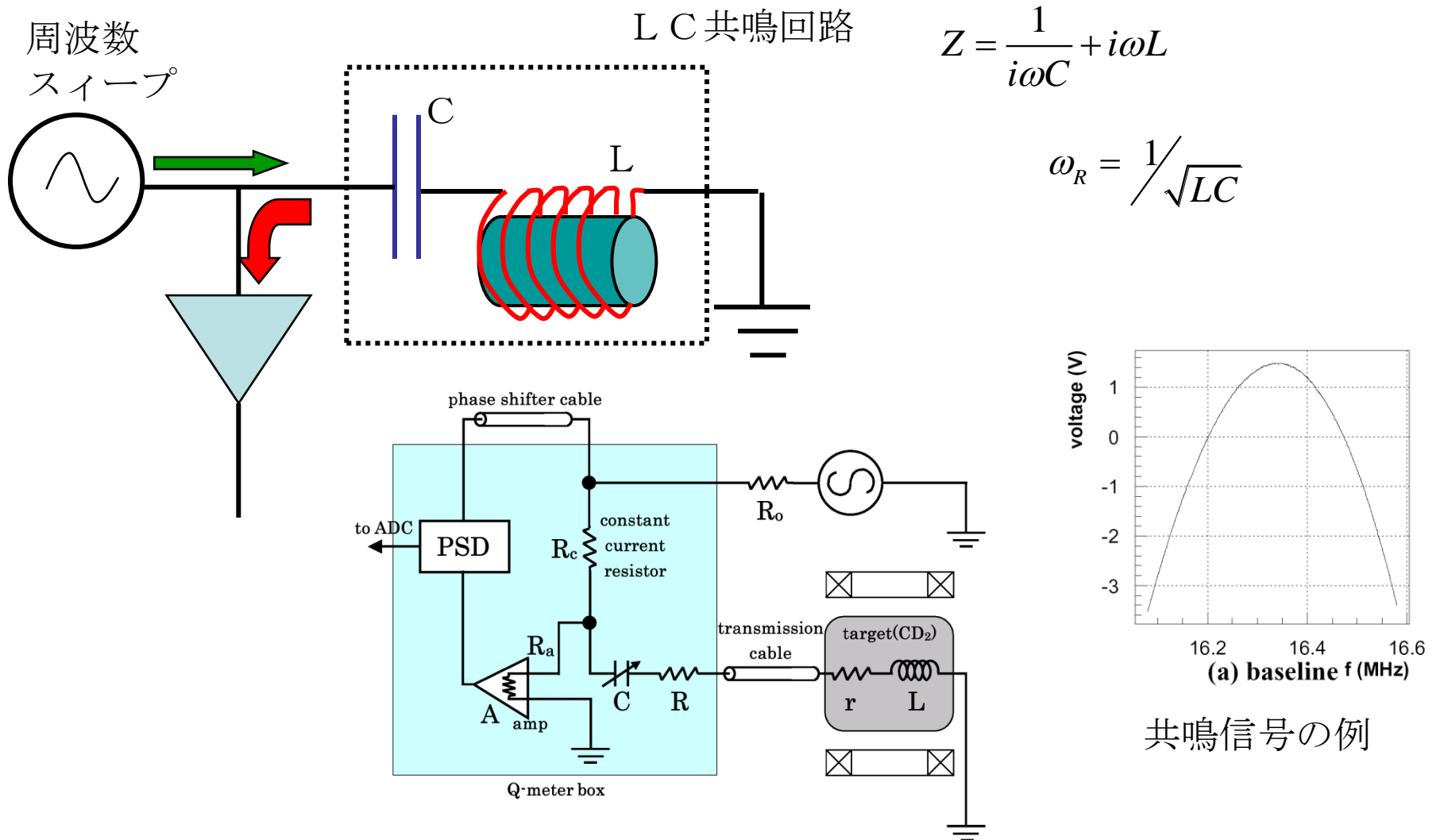
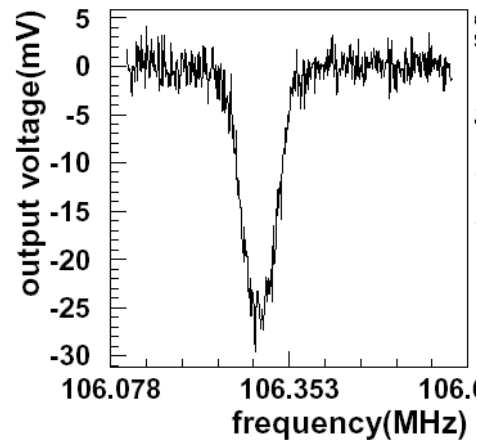


Fig4.3 NMR 信号検出回路

核磁気共鳴信号

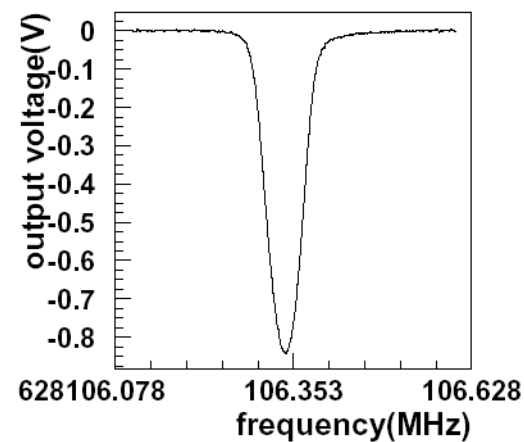
陽子の共鳴信号 $f=106\text{MHz}$ at 2.5T

TE signal



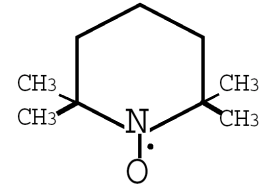
$T=1\text{ K}$ at 2.5T
Without microwave
 $P\sim 0.5\%$

signal in DNP

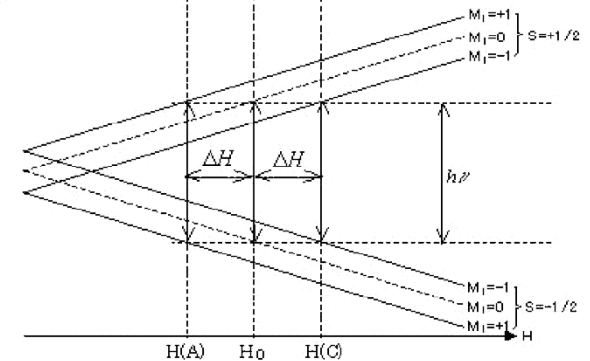
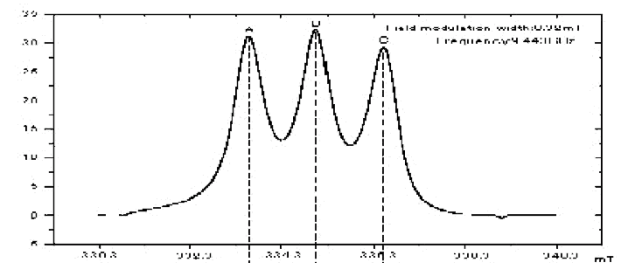
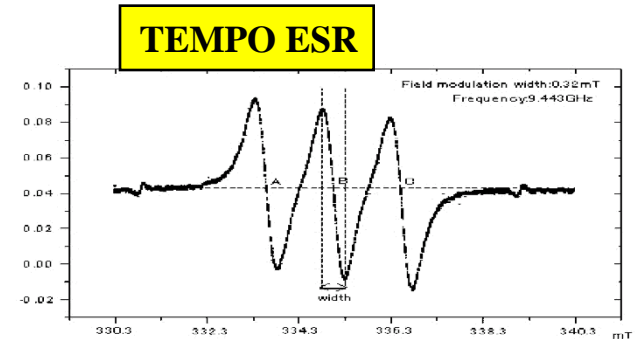


$T=0.3\text{ K}$ at 2.5T
With microwave
 $P\sim 50\%$

標的物質の準備



- 偏極標的試料には自由電子が必要
 - 自由電子を含む物質(フリーラディカル)をドーピング
 - 融解混入(アルコールなど)
 - 拡散混入(高分子)
 - 放射線照射で格子欠陥をつくり自由電子を得る(NH₃, LiD, etc)
- 自由電子濃度: 10^{19} spin/ccが適当
 - 濃度測定: 電子スピン共鳴(ESR)



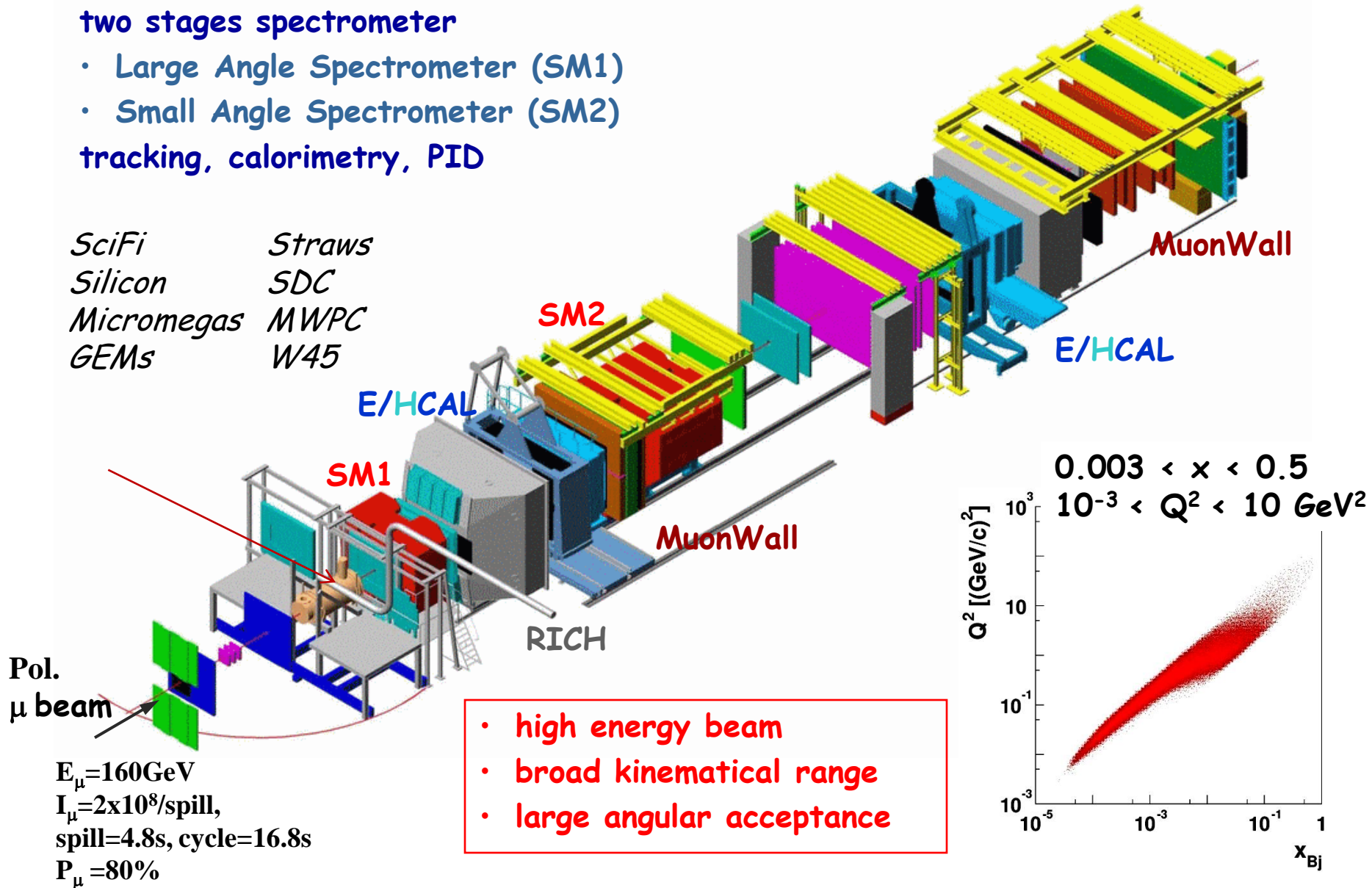
偏極標的实用例

two stages spectrometer

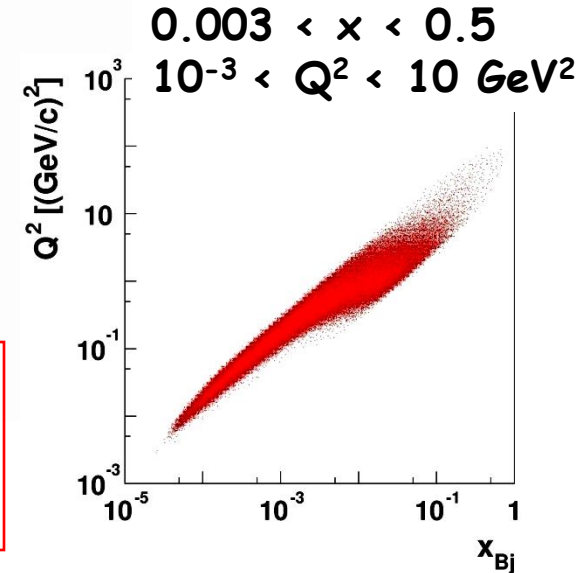
- Large Angle Spectrometer (SM1)
- Small Angle Spectrometer (SM2)

tracking, calorimetry, PID

<i>SciFi</i>	<i>Straws</i>
<i>Silicon</i>	<i>SDC</i>
<i>Micromegas</i>	<i>MWPC</i>
<i>GEMs</i>	<i>W45</i>



- high energy beam
- broad kinematical range
- large angular acceptance



$E_\mu = 160 \text{ GeV}$
 $I_\mu = 2 \times 10^8 / \text{spill}$,
 $\text{spill} = 4.8 \text{ s}$, $\text{cycle} = 16.8 \text{ s}$
 $P_\mu = 80\%$

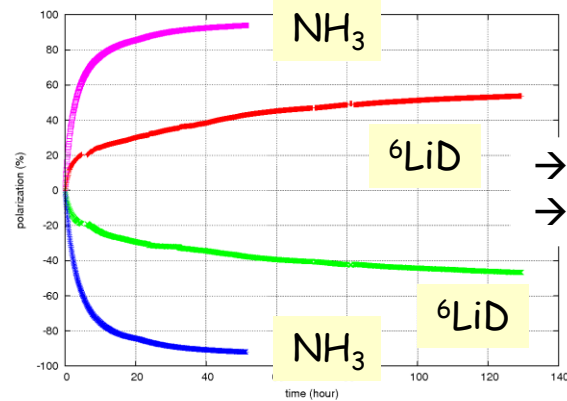
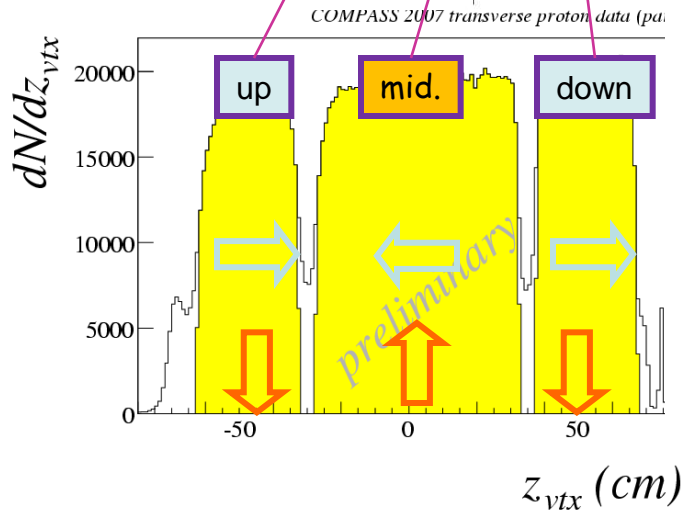
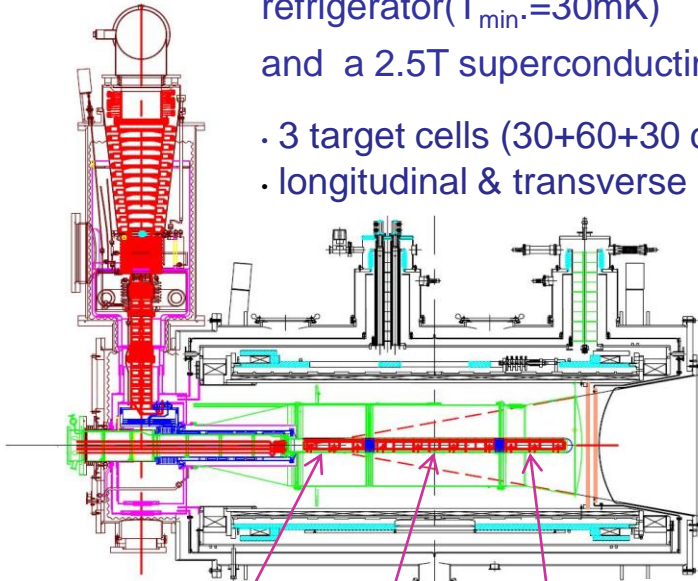
偏極標の実用例

DNP technique with a dilution refrigerator ($T_{\min.}=30\text{mK}$) and a 2.5T superconducting magnet

- 3 target cells (30+60+30 cm)
- longitudinal & transverse modes



世界最大の
偏極標的



- Polarization of NH_3 ~90%
- Polarization of ${}^6\text{LiD}$ ~50%

${}^6\text{Li}$ ($\sim \alpha+d$) also polarized
→ dilution factor $f=50\%$